

2. Gas and particleflow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process/ P. Sangbin, Y. In-Soo, O. Junho, R. Changkook, K. Ja Hyung // Applied Thermal Engineering. – 2014. – №70. – P. 388–396

3. Convective heat transfer characteristics of high-pressure gas in heat exchanger with membrane helical coils and membrane serpentine tubes / Z. Yang, Z. Zhao, Y. Liu, Y. Chang, Z. Cao // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2011. – №35. –P. 1427–1434.

УДК 669.162.12:622.788

**Е. Г. Дмитриева<sup>1</sup>, В. С. Швыдкий<sup>2</sup>, С. Я. Журавлев<sup>2</sup>, И. В. Плесакин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ В СЛОЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

### **Аннотация**

*С целью совершенствования расчетной методики теплообмена в плотных слоях металлургических агрегатов был проведен ряд опытов, позволяющих уточнить коэффициент теплоотдачи между потоком газа и окатышами в процессе нагрева. Исследованиями выявлено в слое окатышей установившееся канальное течение при  $Re = 100 - 1400$ . Был рассчитан коэффициент теплоотдачи и определена температура окатышей в процессе нагрева с точностью  $\pm 11,4$  °С.*

**Ключевые слова:** теплообмен в слое, обжиг окатышей, плотный слой, коэффициент теплоотдачи, гидродинамическое сопротивление, течение газов.

### **Abstract**

*For the sake of improving the calculation procedure for heat transfer in metallurgical unit dense beds a number of experiments has been carried out which allow adjustment of the heat transfer factor between the gas flow and the pellets in the course of heating. In the course of analysis a permanent channeling flow was detected in the pellet bed at  $Re = 100 - 1400$ . The heat transfer factor was calculated and the pellet temperature was determined in the course of heating within  $\pm 11.4$  °C.*

**Key words:** heat transfer in bed, pellet firing, dense bed, heat transfer factor, hydrodynamic resistance, gas flow.

Теплообмен между газом и слоем зернистого материала в значительной мере определяет производительность агрегатов и качество получаемого продукта. Интенсивность теплообмена определяется плотностью теплового потока, поступающего от более горячего тела системы к более холодному, которая, в свою очередь, пропорциональна коэффициенту теплоотдачи  $\alpha_F$  и температурному напору  $\Delta t$ . Однако до настоящего времени отсутствуют математические выражения, позволяющие определить коэффициент теплоотдачи в плотных слоях агломерационных и обжиговых машин, доменных печей и других металлургических агрегатов с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Для слоя окатышей коэффициент теплоотдачи определяют либо по обобщенным экспериментальным зависимостям, предложенным В. Н. Тимофеевым [1], либо по формуле Н. Н. Бережного [1], которая считается наиболее точной:

$$Nu = 0,00028 Re^{1,8}, \quad (1)$$

где  $Nu = \alpha_F d / \lambda_T$  – критерий (число) Нуссельта;

$Re = wd / \nu_T$  – критерий (число) Рейнольдса;

$d$  – диаметр частиц;

$\lambda_T$  – теплопроводность газа;

$w$  – скорость газа в свободном сечении;

$\nu_T$  – кинематическая вязкость газа.

Ошибка в определении коэффициента теплоотдачи по формуле (1) может составлять 30–40 %, что сильно снижает точность теплотехнических расчетов. По-видимому, это вызвано отсутствием единого подхода к рассмотрению теплообмена и газодинамики слоя.

Известны два подхода к рассмотрению теплообмена в слое – с использованием модели струйного обтекания частиц и с применением модели канального течения газов. Однако, как показали исследования [2], струйное течение в зернистых слоях более развито при  $Re > 2 \cdot 10^3$ . Так как при обжиге окатышей  $Re < 2 \cdot 10^3$ , то характер течения газов остается неопределенным. Исходя из общих представлений о гидродинамике плотных слоев, можно предположить, что в этом случае имеет место канальное течение газов. Для доказательства данного утверждения и получения точной зависимости для коэффициента теплообмена в слое можно использовать аналогию Рейнольдса [2].

Рассмотрим уравнение теплообмена в слое в следующем виде [2] (для газов число Прандтля  $Pr = \nu_T / a = 1$ , где  $a$  – коэффициент температуропроводности газов):

$$Nu = C_d Re^n, \quad (2)$$

где  $C_d$  – безразмерный коэффициент, отражающий тепловое сопротивление пограничного слоя на поверхности частиц;

$n$  – константа, определяемая режимом обтекания частиц в слое.

Согласно аналогии Рейнольдса, для ядра потока при  $Pr = 1$  справедливо соотношение [2]:

$$C_d = C_f / 2 = a Re^{-0,5}, \quad (3)$$

где  $C_f$  – коэффициент трения на поверхности тел.

Падение давления при течении газов в трубах и каналах описывается выражением [2]

$$\frac{\Delta p}{L} = f \frac{w^2}{2d} \rho, \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент трения в каналах длиной  $L$ .

Из теории теплообмена известно, что

$$f = C_f / 4. \quad (5)$$

Для слоя шаровых частиц уравнение (4) записывают в виде [1]

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} = \zeta_{\text{сч}} \left( \frac{w^2}{2d} \right) \rho, \quad (6)$$

где  $\zeta_{\text{сл}}$  – коэффициент сопротивления слоя. Несложно заметить, что  $\zeta_{\text{сл}} = f$  в случае, если  $L$  совпадает с высотой слоя  $\Delta h$ . Тогда при подстановке зависимостей (3) и (5) в (2) получим

$$\text{Nu} = C_d \text{Re}^n = (c_f/2) \text{Re}^n = 2f \text{Re}^n = 2\zeta_{\text{сл}} \text{Re}^n, \quad (7)$$

где  $2\zeta_{\text{сл}} \sim \text{Re}^{-0.5}$ .

Таким образом, задача определения коэффициента теплоотдачи в слое сводится к определению коэффициентов  $\zeta_{\text{сл}}$  в уравнении газодинамического сопротивления. Для описания сопротивления плотного слоя окатышей воспользуемся уравнением, описывающим нестационарное фильтрационное течение жидкости или газа в поровом канале [3]:

$$\rho dV / d\tau = -\partial p / dx + \mu \Delta V, \quad (8)$$

где  $dV$  – мгновенный расход жидкости или газа за время  $d\tau$ ;  $p$  – плотность жидкости или газа;  $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$  – оператор Лапласа для поля расходов. Используя локальную скорость газа и переходя с микроуровня к описанию всего слоя, получаем следующее уравнение:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu u}{k} + \frac{\rho u^2}{2l} + \rho \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (9)$$

Здесь первое слагаемое правой части соответствует закону Дарси, в котором  $k$  – коэффициент проницаемости – описывает потери давления на трение жидкости о стенки поровых каналов. Второе слагаемое соответствует потерям при инерционном движении, вызванном непрямолинейностью каналов. В слагаемое входит параметр  $l$ , имеющий размерность длины.

В работе [3] показано, что двухчленный закон сопротивления физически наиболее обоснован для пористых сред и соблюдается при всех числах Рейнольдса. В безразмерной форме для стационарного движения ( $du/d\tau = 0$ ) уравнение (9) может быть записано в виде:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} \frac{2l}{\rho u^2} = \frac{\mu l}{\rho u k} + 1. \quad (10)$$

Если принять  $\zeta^* = d_{\text{экв}}$ , то получим универсальное уравнение сопротивления [3]:

$$\zeta^* = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{2d_{\text{экв}}}{\rho u^2}, \quad (11)$$

где  $\zeta^*$  – универсальный коэффициент сопротивления,

$$\zeta^* = 1/\text{Re}^* + 1 \quad (12)$$

где  $\text{Re}^*$  – универсальное число Рейнольдса, имеющее порядок единицы относительно внешних параметров течения, определяемых числом Рейнольдса в степени  $m$ :

$$\text{Re}^* = \text{Re}^m = \left( \rho \frac{uk}{\mu d_{\text{экв}}} \right)^m. \quad (13)$$

Закон сопротивления в форме (11) можно приближенно считать линейным при  $\text{Re}^* \ll 1$  и квадратичным при  $\text{Re}^* \gg 1$ . Переходя от локальной скорости газа и к скорости фильтрации  $w$  и интегрируя уравнение (11) по высоте слоя, получим уравнение для эквивалентного диаметра канала

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} = \zeta_{\text{сл}} \frac{w^2}{2d_{\text{экв}} \varepsilon^2} \rho, \quad (14)$$

формально совпадающее с уравнением (6).

С целью определения коэффициента  $m$  в уравнении (13) и вычисления  $\zeta_{\text{сл}}$  для слоя обожженных окатышей в лаборатории ОАО «Уралмеханобр» провели ряд исследований на опытно-промышленной установке для обжига окатышей. Установка (рисунок 1) состояла из вертикального цилиндрического канала 1 диам. 100 мм на металлической решетке. В качестве материала засыпки 3 использовали окатыши диаметром 14,5 и 11,0 мм, соотношение которых изменяли в разных опытах, а также смесь разных фракций со средним диаметром 12,9 мм, соответствующую реальному слою окатышей. Высота слоя засыпки 0,3 м была постоянной. Разрежение под слоем создавали водокольцевым насосом.

Расход воздуха (газов) и его температуру на входе в слой измеряли термоанемометром 2 или термопарой 7. Для измерения статического давления по высоте слоя был предусмотрен ряд отверстий для импульсных трубок 4 или термопар 7, отстоящих одна от другой на расстоянии 65,0 мм. Статическое давление и его перепад  $\Delta p$  по высоте слоя при  $h = 0,245$  м замеряли дифманометром 5, значения температуры слоя поступали на термопреобразователь 6 и фиксировались в базе данных. В опытах варьировали расход воздуха и температуру газов на входе в слой, а также его гранулометрический состав. Результаты измерений сопротивления слоя приведены в таблице и на рисунке 2.

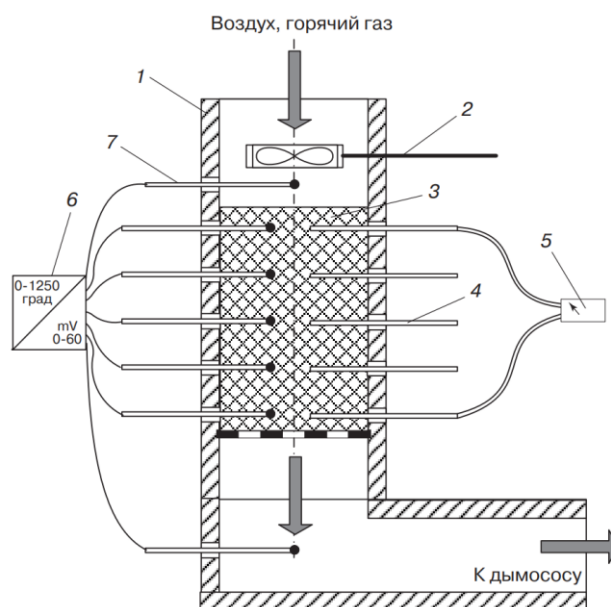


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения газодинамики и теплообмена

Аппроксимируя полученные зависимости, получаем, что показатель степени  $m$  в уравнении (13) при  $Re = 100 - 1400$  равен 0,5, что совпадает со значением для коэффициента трения  $C_f \approx Re^{-0,5}$  для ламинарного течения газа вдоль стенки канала [4].

Коэффициент газопроницаемости  $k$ ,  $m^2$ , в выражении для числа Рейнольдса вычисляли по формуле Козени – Кармана [5]:

$$k = b\varepsilon^2 d^2 / (1 - \varepsilon)^2 \quad (15)$$

Экспериментальные/расчетные значения гидродинамического сопротивления слоя  $\Delta p$ , Па

Скорость фильтрации, м/с	$\Delta p_{\text{эксп}}/\Delta p_{\text{расч}}$ при среднем диаметре, мм, частиц (порозности слоя)			
	14,5 (0,419)	14,15 (0,419)	13,8 (0,404)	12,9 (0,417)
0,2	10/8	11/10	13/11	17/14
0,4	22/22	31/27	33/31	45/40
0,6	40/41	50/49	57/57	75/73
0,8	60/63	81/76	83/88	110/113
1	90/88	108/106	117/122	153/158
1,2	120/118	144/140	157/161	200/208
1,4	160/151	189/184	203/203	253/262
О*	$\pm 7$	$\pm 8$	$\pm 9$	$\pm 12$

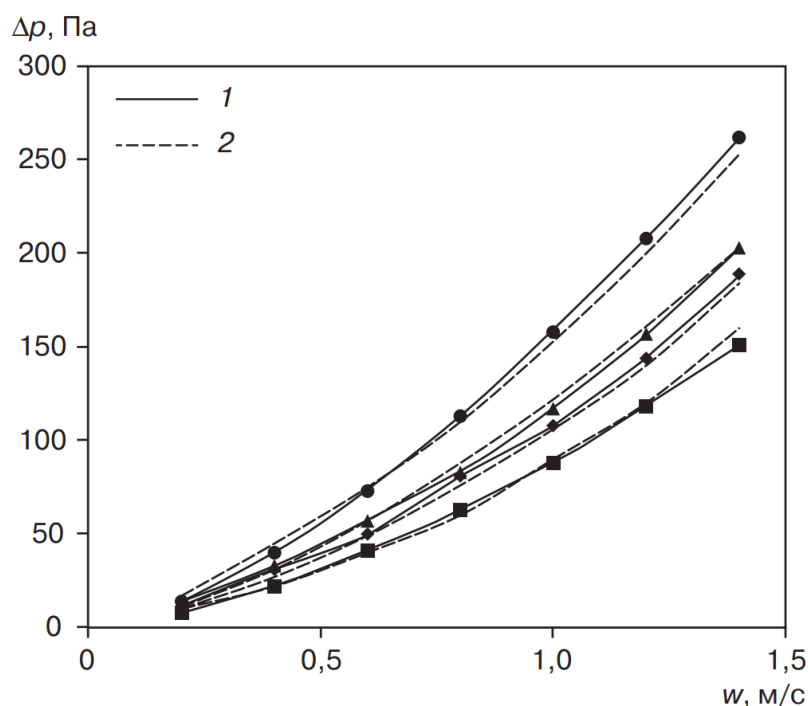


Рис. 2. Зависимость гидродинамического сопротивления слоя от скорости фильтрации (1 – опытные данные; 2 – расчетные данные)

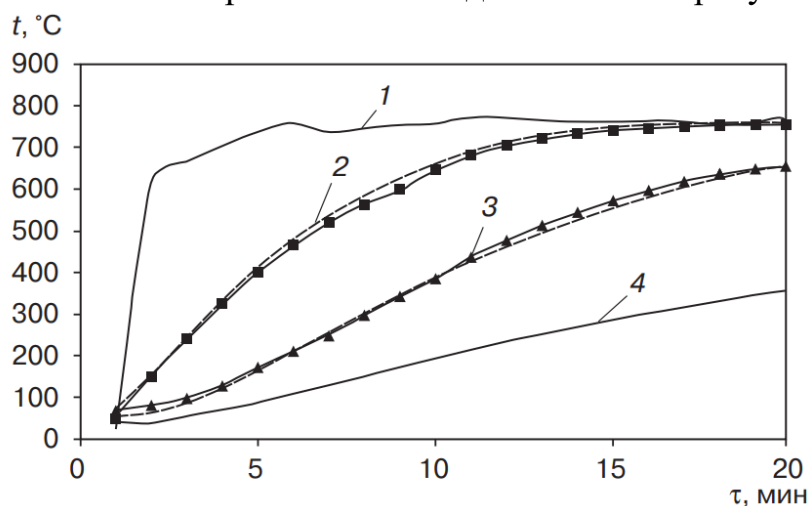
В формуле (14) для ромбоэдрической укладки частиц  $b = 2,25$ , для октаэдрической  $b = 1,78$ . Отметим, что для слоя со средним диаметром 12,9 мм было получено значение  $b = 2,25$ , соответствующее ромбоэдрической укладке – наиболее характерно для хаотических упаковок [1]. Таким образом, для слоя окатышей можно записать уравнение, характеризующее газодинамику слоя:

$$\frac{\Delta p}{\Delta h} = \frac{\rho w^2}{2\sqrt{\text{Re}_{\text{экв}}} \varepsilon^2 d_{\text{экв}}}, \quad (16)$$

где коэффициент сопротивления слоя  $\zeta_{\text{сл}} = (\text{Re})^{-0,5}$ .

Проверим достоверность расчета коэффициента теплообмена в слое окатышей подстановкой полученных значений  $\zeta_{\text{сл}}$  в уравнение (7), при этом будем полагать, что в слое развит теплообмен в каналах, образованных ламинарным пограничным слоем с периодической завихренностью и ядром потока [4]. Для сравнения полученных расчетных значений коэффициента теплоотдачи  $\alpha_F$  с практическими был проведен ряд экспериментов по нагреву слоя окатышей на установке, представленной на рисунке 1.

Газы, поступающие в слой, нагревали до 800 °С с помощью горелочного устройства, температуру газов поддерживали постоянной. Высота слоя составляла 0,3 м, скорость фильтрации газов  $w = 0,8$  м/с (при нормальных условиях), средний диаметр окатышей 14,15 мм. Результаты эксперимента и данные, рассчитанные по методике [1], для которой  $\alpha_F$  определяли по формуле (7), представлены на рисунке 3, из которого видно, что экспериментальные и расчетные температуры материала в период нагрева практически не отличаются, погрешность составляет  $\pm 11,4$  °С, т. е. гипотеза о канальном течении газов в слое окатышей при  $Re = 100 - 1400$  подтверждается. Следовательно, использование метода расчета коэффициента теплоотдачи на основе уравнений гидродинамики слоя позволило обеспечить высокое совпадение расчетных и экспериментальных данных по нагреву слоя окатышей.



1 —  $t_r$  на входе; 2 — на расстоянии 0,1 м от поверхности; 3 — к на расстоянии 0,2 м от поверхности; 4 —  $t_r$  на выходе из слоя (— опытные данные; — — расчетные данные)

Рис. 3. Изменение температуры газов и окатышей в период нагрева до 800 °С

Исследования с использованием аналогии Рейнольдса между теплообменом и гидродинамикой плотного слоя позволили уточнить коэффициент теплоотдачи между потоком газа и окатышами в процессе нагрева. Применение теории фильтрационного течения газов и анализ полученных данных дали возможность выявить в слое окатышей установившееся канальное течение при  $Re = 100 - 1400$ , характер которого определяется коэффициентом газодинамического сопротивления и скоростью потока. Однако при переходе к реальным условиям обжига на конвейерных машинах необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на теплоотдачу газов, — усадку окатышей, изменение теплоемкости газов и окатышей, неравномерность поля скоростей фильтрации по ширине машины и др.

## Список использованных источников

1. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Евстюгин С.Н. [и др.]. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей. – Екатеринбург: НПВП «ТОРЭКС», 2012. – 340 с.
2. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР / Под ред. П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1969. – 547 с.
4. Деменюк С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках. – СПб.: Страта, 2012. – 192 с.
5. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.: Техиздат, 1947. – 245 с.

УДК 662.7

**И. Г. Донской**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ И БИОМАССЫ В ПОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ ТИПА SHELL-PRENFLO

### Аннотация

*Процесс газификации низкосортных топлив может быть неустойчивым из-за их низкой теплотворной способности, а также часто сопровождается образованием смолистых продуктов, поэтому добавление угля способствует повышению эффективности их переработки. С другой стороны, высокая реакционная способность биомассы может способствовать стабилизации режимов горения и газификации низкореакционных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки. Совместная газификация топлив с существенно отличающимися свойствами не только смещает оптимальные режимы работы газогенератора (по удельному расходу окислителя и условиям шлакования), но и существенно влияет на процессы, связанные с подготовкой горючего газа к использованию в камере сгорания или каталитическом реакторе. В работе проведено численное исследование стационарных режимов газификации угольной пыли с добавлением биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем. Получены расчетные зависимости эффективности процесса от управляющих параметров: доли биомассы в смеси с углем и удельного расхода кислорода.*

**Ключевые слова:** газификация, уголь, биомасса, процесс Копперса-Тотцека, математическое моделирование

### Abstract

*The process of gasification of low-grade fuels can be unstable because of their low calorific value, and often accompanied by the formation of tarry products, so the addition of coal improves the efficiency of their processing. On the other hand, the high reactivity of biomass can contribute to the stabilization of combustion and gasification regimes of low-reactivity fuels, such as high grade coals or coke residues of oil refining. Co-gasification of fuels with significantly different properties displaces optimal operating modes of the gasifier (values of the specific consumption of the oxidizer and slagging temperatures) and*